مطالعه‌ی عددی عملکرد شمع‌های حرارتی بااستفاده از مدل‌های رفتاری ترمومکانیکی و مکانیکی *

علی جمالو [۱] مهدی خداپرست [۲] سیدعلی قریشیان امیری [۳]

چکیده در سال‌های اخیر مدل‌های رفتاری متعددی برای پیش‌بینی رفتار خاک تحت اثر بارهای ترمومکانیکی ارائه شده‌است. از سوی دیگر برر سی رفتار شمع‌های حرارتی و خاک مجاور آن تحت بارهای ترمومکانیکی و باا ستفاده از مدل‌های رفتاری که در آنها تغییر رفتار خاک در اثر تغییرات دما درنظر گرفته می شود، از اهمیت زیادی برخوردار ا ست. در این تحقیق یک مدل رفتاری ترمومکانیکی به نرم‌افزار المان محدود آباکوس ا ضافه شده‌ا ست تا از آن برای برر سی عملکرد شمع‌های حرارتی، ا ستفاده شود. نتایج به‌د ست‌آمده از مدل سازی عددی آزمایش سه‌محوری نشان می‌دهد که کد نوشته‌شده برای مدل رفتاری مورد نظر توانایی پیش‌بینی رفتار خاک در شرایط ترمومکانیکی را دارد. هم‌چنین نتایج به‌د ست‌آمده از تحلیل شمع حرارتی باا ستفاده از مدل‌های رفتاری مکانیکی دراکر-پراگر، کم‌کلی ا صلاح شده و ترمومکانیکی تورچی بیانگر آن ا ست که باوجود تأثیر قابل‌توجه انتخاب مدل رفتاری بر نتایج در تحلیل شمع حرارتی، تفاوتی میان انتخاب مدل رفتاری مکانیکی و ترمومکانیکی برای خاک کنار آن وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی شمع حرارتی، مدل رفتاری خاک، ترمومکانیک، اثر دما بر خاک، آباکوس.

The Numerical Study of Energy Piles Performance by Using of Thermo-Mechanical and Mechanical Constitutive Models

M. Khodaparast S. A. Ghoreishian Amiri A. Jamalloo

Abstract *In recent years, several constitutive models have been proposed to predict soil behavior under thermomechanical loads. On the other hand, it is important to study the behavior of energy piles and their adjacent soils under thermomechanical loads and by using constitutive models in which soil behavior changes due to temperature changes are considered. In this study, a thermomechanical constitutive model was added to the Abaqus finite element software to be used to evaluate the performance of energy piles. Results obtained from numerical modeling of Triaxial test show that the code written for the given constitutive model is capable of predicting soil behavior under thermomechanical conditions. Also, the results obtained from the analysis of energy pile using mechanical constitutive models of Drucker-Prager, MCC and thermo-mechanical constitutive model Tourchi show that in the analysis of energy pile, although the choice of constitutive model has a significant impact on the results, but there is no difference between choosing a mechanical or thermomechanical constitutive model for the adjacent soil.*

Key Word Energy pile, Constitutive model of soil, Thermomechanic, Temperature effect on soil, Abaqus.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۷/۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۸/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم.

(۳) پژوهشگر ارشد گروه مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و صنعت نروژ.

Email: khodaparast@qom.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر در مناطق مختلف جهان ساخت ساختمان‌های مسکونی و تجاری با رویکرد بهینه سازی مصرف انرژی باا ستفاده از شمع‌های حرارتی تبدیل به یک فنّاوری نوظهور شده‌است [1]، لذا توجه به تحقیقات حوزه‌ی ژئوتکنیک در این خصوص که به بررسی تغییرات مقاومت و تغییر شکل خاک ناشی از تغییرات دما پرداخته‌است، بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته‌است [2].

مطالعات گذشته در این زمینه به دو دسته مطالعات رفتار خاک تحت اثر دما و مطالعات عملکرد شمع های حرارتی قابل‌تقسیم است. براساس تحقیقات انجام شده در دسته‌ی اول، افزایش دمای خاک منجر به کاهش تنش پیش‌تحکیمی و شیب خط حالت بحرانی خاک می شود [3,4]. هم‌چنین محققان دیگری اثر دما بر مقاومت برشی را بررسی کرده و نتایج متفاوت و متضادی از جمله افزایش مقاومت برشی [5-7] و کاهش مقاومت برشی [5,8,9] را گزارش کرده‌اند. هم‌چنین گزارش‌های برخی از مطالعات گذ شته تأثیر ناچیز دما بر مقاومت بر شی را نشان داده‌است [6,10].

از طرفی در سه دهه‌ی اخیر مدل‌های رفتاری ترمومکانیکی متعددی برای خاک های مختلف ارائه شده‌است که برای رس‌ها، مدل‌های رفتاری برمبنای کم‌کلی اصلاح‌شده سهم قابل توجهی از آنها را دربرگرفته‌است [4,11-15]. عملکرد چند مدل رفتاری ارائه‌شده برای خاک‌های رس اشباع تا سال ۲۰۱۳ توسط هانگ و همکاران [16] مورد بررسی قرار گرفته‌است. بررسی‌های وی نشان‌دهنده این است که تمامی مدل‌ها پیش‌بینی معقولی از رفتار ترمومکانیکی خاک رس اشباع داشته‌اند. با این حال هر مدل رفتاری دارای محدودیت‌ها و فرضیاتی در تئوری خود هستند که در نتایج مؤثر بوده‌است. هانگ و همکاران [17] مدل ارائه‌شده توسط کوی و همکاران [4] را گسترش دادند و دو مکانیسم پلاستیک TY و LY را به‌ترتیب برای انقباض و انبساط حرارتی در نسبت پیش‌تحکیمی بالا و اثر دما بر فشار پیش‌تحکیمی معرفی کردند. درنهایت به‌منظور بررسی عملکرد مدل رفتاری ارائه‌شده، نتایج آزمایشگاهی یک آزمایش سه‌محوری زهکشی‌شده برروی خاک رس بوم با نتایج به‌دست‌آمده از مدل رفتاری مقایسه شد.

شیونگ و همکاران [2] نیز براساس مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح‌شده یک مدل رفتاری ترمومکانیکی برای خاک ارائه داده‌اند که با قرار دادن مقدار OCR برابر یک در آن، مدل با مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح‌شده برابر می‌شود. طبق بررسی‌های انجام‌شده توسط این محققان رفتار ترمومکانیکی خاک وابسته به تأثیر تغییرات دما بر دو پارامتر تنش پیش‌تحکیمی و نسبت تنش بحرانی است و بررسی تعادل بین اثر تغییرات دما بر این دو پارامتر امکان تعیین رفتار سخت شونده یا نرم شونده‌ی حرارتی را ممکن می‌کند. هم‌چنین مطالعات گسترده‌ای درزمینه‌ی بررسی عملکرد شمع‌های حرارتی به صورت تک [18-21] و گروه [1,22-24] انجام شده‌است. لالویی و همکاران [۱۸] در یک مطالعه‌ی عددی و صحرایی به بررسی عملکرد شمع‌های حرارتی پرداخته‌اند که در مدل‌سازی عددی آنها از یک مدل رفتاری ترموالاستوپلاستیک برمبنای مدل رفتاری دراکر–پراگر استفاده شده است. طبق تحقیقات ایشان تنش محوری ناشی از بارگذاری حرارتی و بارگذاری ترمومکانیکی بزرگ‌تر از تنش محوری ناشی از بار مکانیکی می‌باشد و افزایش دما به‌میزان یک درجه‌ی سانتی‌گراد، ۱۰۰ کیلونیوتن بار محوری را افزایش می‌دهد.

آماتیا و همکاران [25] مکانیسم ارائه‌شده را در دو حالت گیرداری کامل و آزاد بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تنش ناشی از بار حرارتی درحالتی‌که دو سر شمع به‌طور کامل گیردار باشد از سایر حالات بیشتر است. مشاهدات ایشان نشان‌دهنده افزایش نشست در بارگذاری ترمومکانیکی نسبت به بارگذاری مکانیکی نیز می‌باشد. آکروچ و همکاران [26] یک آزمایش کشش شمع برروی شمع حرارتی در خاک با پلاستیسیته‌ی بالا

انجام دادند. نتایج آزمایش های آنها بیان می‌کند که افزایش دمای خاک منجر به افزایش نرخ خزش می شود به‌طوری‌که باتوجه منحنی بار- جابه‌جایی، نشست شمع حرارتی در طولانی مدت (۵۰ سال) حدود ۲٫۳۵ برابر نشست شمع عادی در همین شرایط می‌باشد.

خداپرست و همکاران [20] به مطالعه‌ی عددی اثر دما بر ظرفیت باربری و نشست تحکیمی شمع‌های حرارتی در خاک‌های ریزدانه‌ی اشباع پرداختند و مدل رفتاری دراکر- پراگر را برای پیش‌بینی منحنی تنش و کرنش خاک درنظر گرفتند. تحقیقات ایشان نشان داد که افزایش مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و نسبت تخلخل تحت بارگذاری حرارتی موجب میزان کاهش بیشتر در تنش مؤثر قائم درمقایسه با شرایط ژئواستاتیکی می‌شود.

نگویان و همکاران [27] به بررسی رفتار بلندمدت شمع های حرارتی بااستفاده از یک مدل فیزیکی پرداختند. در تحقیق آنها بارهای مکانیکی مختلفی (از ۰ تا ۶۰ درصد مقاومت شمع) بر آن وارد شد و همزمان با آن ۳۰ سیکل حرارتی نیز به شمع اعمال گردید. بررسی‌های آنها نشان داد که اعمال سیکل‌های حرارتی و اعمال بار ثابت منتهی به نشست پلاستیک (برگشت‌ناپذیر) در سر شمع می‌شود. تورچی [28] یک مدل رفتاری ترمومکانیکی برا ساس مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح‌شده و نظریه‌ی حالت بحرانی، برای خاک رس در شرایط اشباع ارائه داده‌است که در آن کرنش‌های الاستیک ناشی از افزایش دما، اثر دما بر شیب حالت بحرانی و تأثیر نسبت پیش‌تحکیمی در مدول برشی، درنظر گرفته شدها ست. پارامترهای ا ضافه شده به مدل کم‌کلی ا صلاح شده در تحقیق آنها باا ستفاده از آزمایش سه محوری به‌آسانی قابل دست‌یابی بوده‌است. آنها برای صحت‌سنجی، نتایج مدل رفتاری خود را با ۵ سری داده‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی گذشته مقایسه کرده‌اند که توانایی منا سب مدل رفتاری آنها در پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی خاک های ر سی ا شباع در این مقایسه قابل مشاهده‌است. جزئیات فرمولاسیون مدل رفتاری آنها در بخش بعد به‌طور کامل آمده‌است.

در این مقاله عملکرد شمع حرارتی در خاک رس اشباع تحت بارگذاری حرارتی و مکانیکی بااستفاده از سه مدل رفتاری متفاوت بررسی شده‌است. در مطالعات عددی گذشته عمدتاً از مدل‌های رفتاری مکانیکی و ترمومکانیکی متفاوتی برای توصیف رفتار خاک مجاور شمع حرارتی استفاده شده‌است. بر این اساس هدف از مطالعه‌ی حا ضر، تعیین میزان تأثیر مدل رفتاری خاک بر نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی شمع‌های حرارتی بوده‌است. برای این منظور ابتدا یک سابروتین یومت برای مدل رفتاری تورچی [28] که برای پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی خاک رس ا شباع ارائه شدها ست، نو شته شد. سپس برای صحت سنجی کد مذکور از یک مدل سه‌بعدی آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی‌شده CD استفاده گردید و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی مقایسه شد. درنهایت نیز یک مدل سه‌بعدی المان محدود برای تحلیل عملکرد شمع حرارتی بااستفاده از مدل رفتاری تورچی [28] و مدل رفتاری دراکر- پراگر و کم‌کلی اصلاح‌شده برای شبیه‌سازی رفتار خاک در آباکوس ۲۰۱۷ ساخته شد. هم‌چنین نتایج به‌دست‌آمده از این دو تحلیل با نتایج عددی و آزمایشگاهی گزارش‌شده توسط لالویی و همکاران [18] مقایسه گردیده‌است.

مدل رفتاری و مدل‌سازی عددی

مدل رفتاری

در این تحقیق برای توصیف رفتار ترمومکانیکی خاک از سابروتین یومت مدل رفتاری تورچی [28] که در طی این مطالعه نوشته‌شد، استفاده گردیده‌است. این مدل رفتاری با گسترش مدل حمیدی و خزایی [15] به یک مدل ترموالاستوپلاستیک تبدیل شده‌است و در آن درنظر گرفتن اثرات حرارت بر رفتار خاک براساس ایده‌ی تفاوت میان منحنی تحکیم ایزوتروپ در دمای

مرجع و دمای بالا می‌باشد. هم‌چنین در مدل تورچی [28] تأثیر تغییرات دما بر شیب خط حالت بحرانی، سطح تسلیم و نسبت پیش‌تحکیمی اضافه شده‌است که در مدل حمیدی و خزایی [15] درنظر گرفته نشده‌بود.

روابط مدل ارائه‌شده در فضای تنش سه‌محوری از دو قسمت الاستیک و پلاستیک تشکیل شده که در قسمت الاستیک برای محاسبه‌ی کرنش‌های حجمی از روابط (۱) و (۲) و (۳) استفاده شده‌است.

$$d\varepsilon_v^e = d\varepsilon_{vT}^e + d\varepsilon_{vp}^e \quad (۱)$$

$$d\varepsilon_{vT}^e = 3\alpha_e dT \quad (۲)$$

$$d\varepsilon_{vp}^e = \frac{1}{K} dp' \quad (۳)$$

در روابط بالا α_e ضریب انبساط حرارتی حجمی و K مدول بالک است و از رابطه‌ی (٤) به‌دست می‌آید:

$$K = \frac{v_0 p_0'}{\kappa_T} \left(\frac{p'}{p_0'}\right)^a \quad (٤)$$

که در آن v_0 حجم مخصوص اولیه و a و b پارامترهای مدل می‌باشد.

هم‌چنین برای محاسبه‌ی کرنش برشی فقط از مؤلفه‌ی کرنش برشی مکانیکی استفاده شده و از کرنش برشی حرارتی صرف‌نظر شده‌است.

$$d\varepsilon_s^e = d\varepsilon_{sT}^e + d\varepsilon_{sp}^e \quad (۵)$$

$$d\varepsilon_s^e = d\varepsilon_{sp}^e = \frac{dq}{G_{T(OC)}} \quad (٦)$$

که در روابط (۵) و (٦) و (۷) D پارامتر مدل، G_{T0} مدول برشی در دمای اولیه و G_T مدول برشی در دمای ثانویه می‌باشد.

در قسمت پلاستیک نیز باتوجه به این‌که پارامتر سخت‌شوندگی تنش پیش‌تحکیمی درنظر گرفته شده‌است، نمو کرنش حجمی بااستفاده از رابطه‌ی (۸) محاسبه شده‌است:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{1}{H_L} \frac{dp'_{Ct}}{p'_{Ct}} \quad (۸)$$

$$H_L = \frac{\upsilon}{\lambda - \kappa_T - (N\delta e_T)\left(\frac{M_T}{M_T - \eta}\right)} \quad (۹)$$

$$\eta = \frac{q}{p'} \quad (۱۰)$$

در روابط (۹) و (۱۰) M_T شیب خط حالت بحرانی و υ حجم مخصوص می‌باشد. هم‌چنین در این مدل رفتاری رابطه‌ای برای تبدیل p'_c تنش پیش‌تحکیمی در دمای محیط به p'_{cT} تنش پیش‌تحکیمی در دمای بالا ارائه شده‌است.

$$p'_{cT} = p'_c \exp(-3\rho^p H_0 \Delta T) \quad (۱۱)$$

با درنظر گرفتن قانون جریان همراه، بااستفاده از رابطه‌ی (۱۲) کرنش برشی پلاستیک محاسبه شده‌است.

$$d\varepsilon_s^p = \frac{d\varepsilon_v^p}{\psi} \quad (۱۲)$$

$$\psi = \frac{\alpha[M^2(\beta-1) - \eta^2]}{2\theta\eta} \quad (۱۳)$$

معادله‌ی سطح تسلیم نیز با اضافه‌شدن پارامترهای α و β و θ به معادله‌ی سطح تسلیم مدل کم‌کلی اصلاح‌شده، به‌صورت رابطه‌ی (١٤) بازنویسی شده‌است:

$$q = M_T p' \left\{\frac{\alpha^2(\beta-1)}{2\theta-1}\left[\left(\frac{p'_{cT}}{p'}\right)^{\frac{1}{\Omega}} - 1\right]\right\}^{0.5} \quad (١٤)$$

$$\Omega = \frac{\theta}{2\theta-1} \quad (۱۵)$$

برای نوشتن سابروتین یومت برای مدل رفتاری مذکور، ابتدا ماتریس الاستیک و الاستوپلاستیک آن به‌دست آمده‌است که براین اساس برای تشکیل ماتریس الاستیک رابطه‌ی (١٦) و برای تشکیل ماتریس الاستوپلاستیک مدل رفتاری از رابطه‌ی (۱۷) استفاده شده‌است [29].

$$[D^e] = 2G[I] + \left(K - \frac{2G}{3}\right).\{\delta\}.\{\delta\}^T \quad (١٦)$$

$$D^{ep} = D^e - \frac{D^e\left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right)\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^T D^e}{\left(\frac{\partial F}{\partial \varepsilon^p}\right)^T\left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right) + \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^T D^e\left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right)} \quad (۱۷)$$

پس از تشکیل ماتریس‌ها، تابع تسلیم تعریف شده و شرط استفاده از هرکدام از ماتریس‌ها طبق تابع تسلیم برقرار شده‌است.

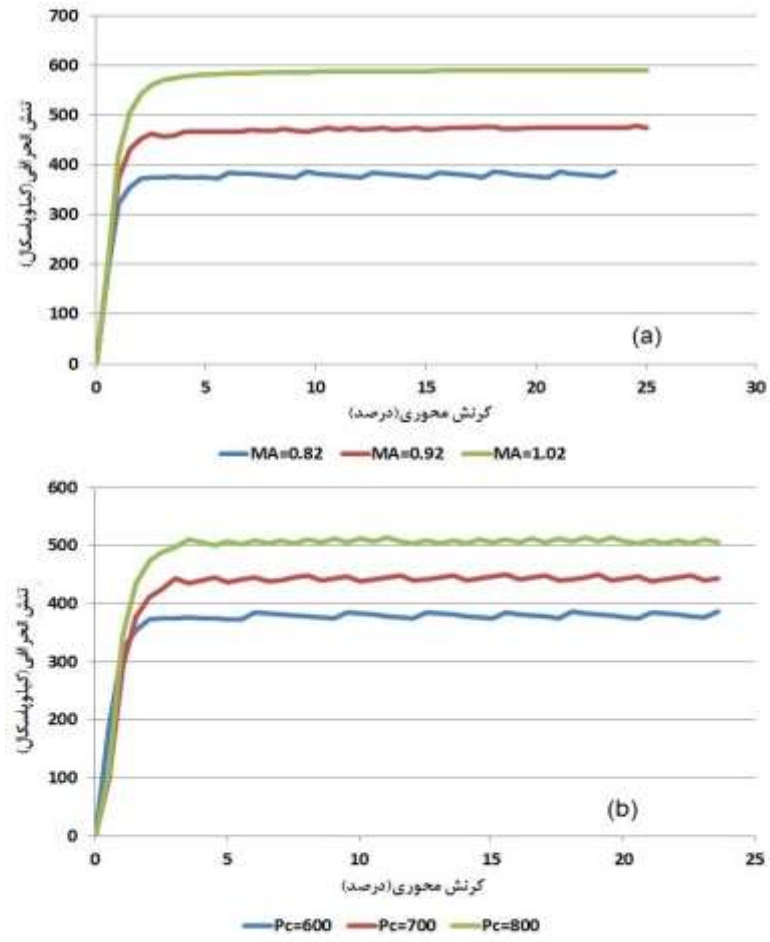
مطالعه‌ی پارامتری مدل رفتاری

در این قسمت به‌منظور بررسی بیشتر مدل رفتاری تورچی [28] نمودار تنش کرنش به‌دست‌آمده با تغییر برخی از پارامترهای موجود در آن ارائه شده‌است که برنامه‌ی این مطالعه‌ی پارامتری در جدول (۱) آمده‌است.

رابطه‌ی تنش تسلیم با دما، نسبت پیش‌تحکیمی و شیب خط حالت بحرانی به‌صورت مستقیم است و کاهش هریک از آنها به کاهش مقاومت برشی منجر شده‌است (شکل ۱).

جدول ۱ برنامه‌ی مطالعه‌ی پارامتری مدل رفتاری تورچی [28] بااستفاده از مدل عددی آزمایش سه‌محوری

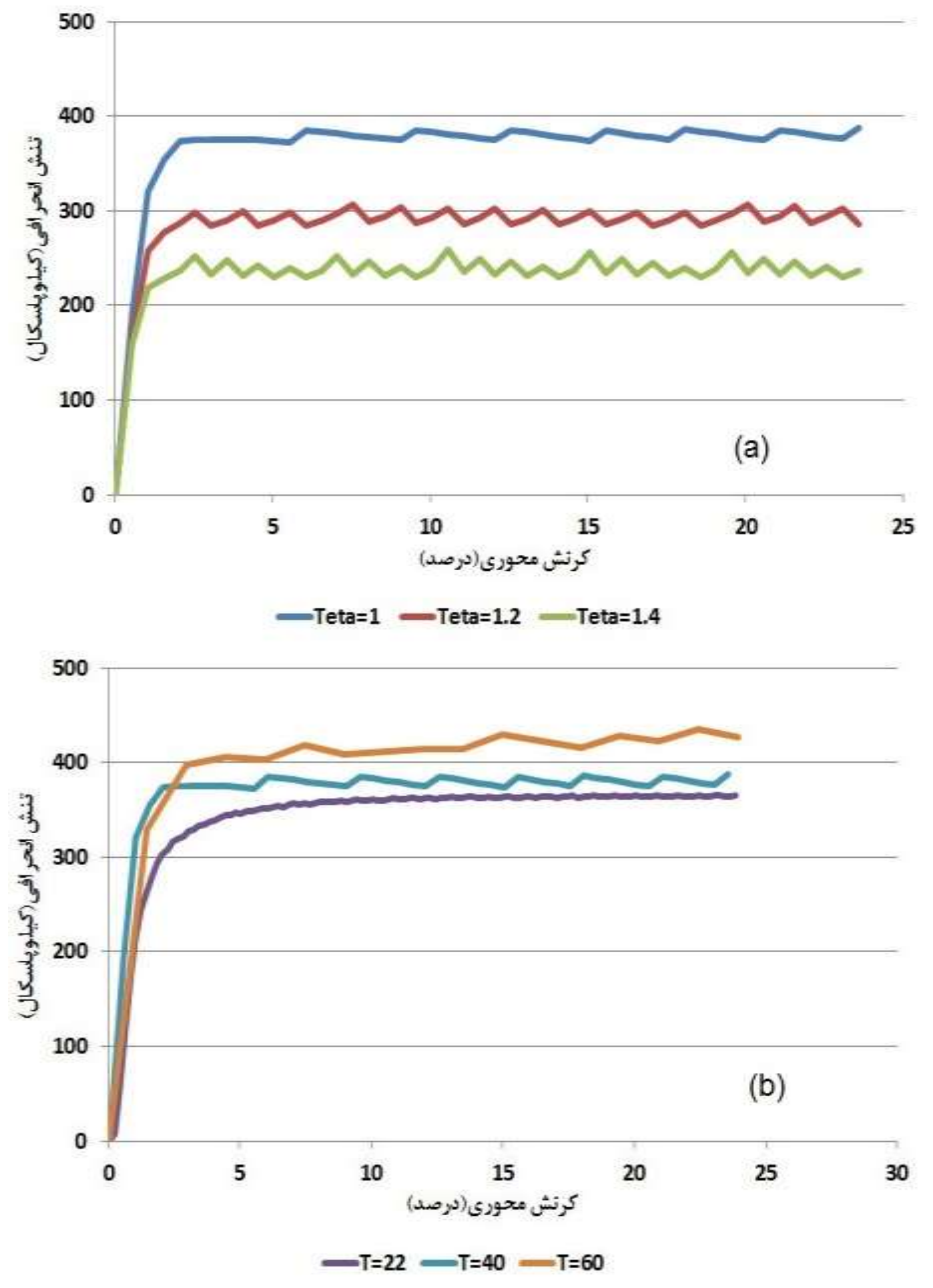
مطالعه‌ی پارامتری										
شماره‌ی مدل	دما	تابع تسلیم					قسمت الاستیک			
	T	A	θ	B	MA	Pc(kPa)	C	D	κA	(a,b)
1	22	0.8	1	1.75	0.82	600	0.14	5	0.028	2.5
2	40	0.85	1.2	1.85	0.92	700	0.24	10	0.04	5
3	60	0.9	1.4	1.95	1.02	800	0.34	15	0.05	7.5



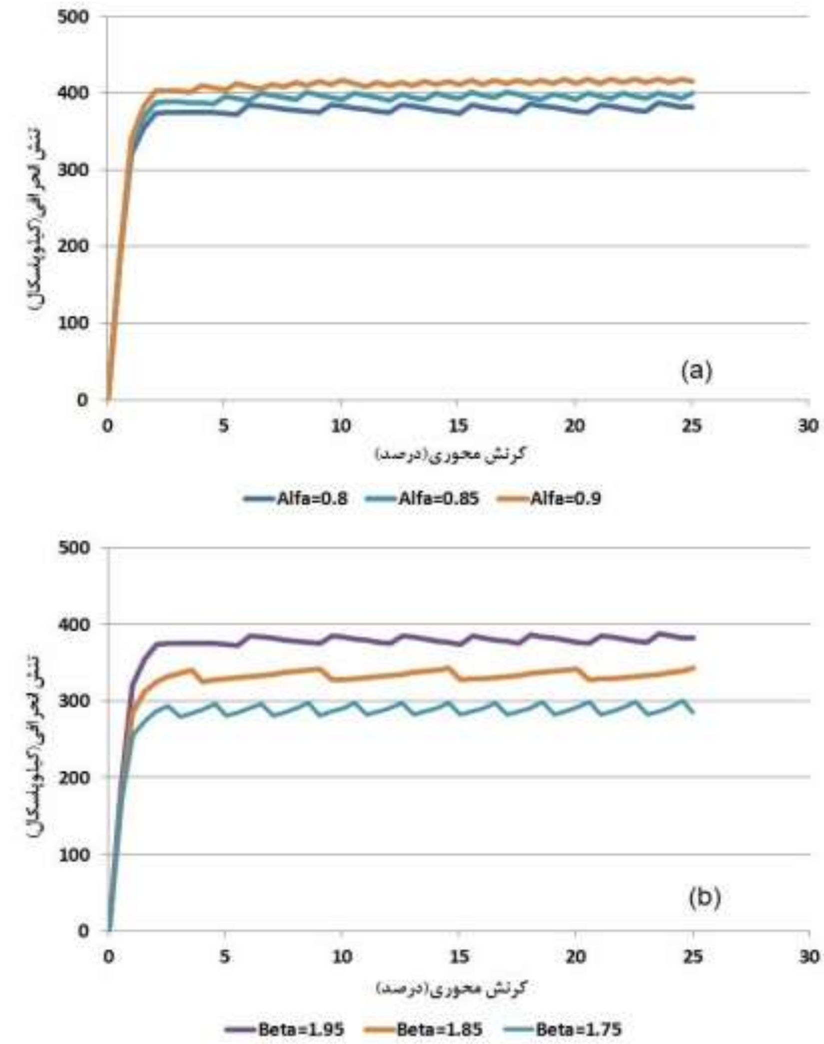
شکل ۱ اثر تنش پیش‌تحکیمی و شیب خط حالت بحرانی بر نمودار تنش- کرنش خاک در دمای ۴۰ درجه: الف) شیب خط حالت بحرانی، ب) تنش پیش‌تحکیمی

تأثیر دما و پارامترهای موجود در رابطه‌ی تابع تسلیم بر نمودار تنش- کرنش نیز در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

باتوجه به شکل (۳) مشاهده می شود که افزایش پارامترهای β و α باعث افزایش مقاومت برشی خاک شده است و بر خلاف آنها برای افزایش مقاومت برشی کاهش θ مورد نیاز است. از سه پارامتر اضافه‌شده به رابطه‌ی تنش تسلیم دو پارامتر θ و β مؤثرتر از پارامتر α بوده‌است.



شکل ۲ اثر پارامتر θ و دما بر نمودار تنش- کرنش خاک: الف) پارامتر θ، ب) دما



شکل ۳ اثر پارامترهای تابع تسلیم بر نمودار تنش- کرنش خاک در دمای ٤٠ درجه: الف) پارامتر α، ب)پارامتر β

جدول ۲ مشخصات نمونه خاک براساس مدل رفتاری تورچی [28] در مدل آزمایش سه‌محوری

داده‌های آزمایشگاهی	M	$\underline{\lambda}$	κA	GA/p'0	χ	$\underline{n}$	C	D	$\underline{c}$
چکرواک و لالویی [7]	0.82	0.102	0.028	88	0.25	0	0.14	5	1.8

* پارامتر M شیب خط حالت بحرانی، پارامتر λ شیب خط تحکیم عادی، پارامتر κA شیب خط باربرداری و پنج پارامتر χ، C، D، c و n پارامترهای مدل هستند.

مدل‌سازی عددی آزمایش سه‌محوری CD

در مرحله‌ی اول برای بررسی عملکرد سابروتین یومت در مدلی با یک المان، مدل آزمایش سه‌محوری که هندسه‌ی نمونه‌ی مورد آزمایش در آن یک استوانه به‌قطر ٥,٥ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر می‌باشد، ساخته شده‌است.

برای شبیه‌سازی رفتار خاک از سابروتین یومت استفاده شده و مشخصات خاک نمونه باتوجه به کد ارائه‌شده در جدول (۲) آمده‌است.

در این مدل تحلیل با دو گام مختلف انجام شده‌است که در گام اول تحکیم خاک با تنش اولیه

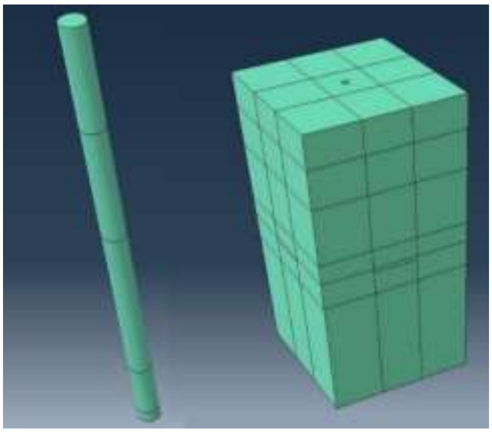
صورت گرفته و در گام دوم برای شبیه‌سازی فرآیند زهکشی، بارگذاری به‌صورت کنترل جابه‌جایی با سرعت تقریبی ۰,٤ میلی‌متر بر ساعت صورت گرفته‌است. برای مش‌بندی خاک نیز از المان هشت‌گرهی خطی (C3D8P) که از گروه فشار آب حفره‌ای- تنش می‌باشد، استفاده شده‌است.

تنش پیش‌تحکیمی خاک مورد بررسی ٦۰۰ کیلوپاسکال است که با فرض نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و ۳ ، تنش اولیه‌ی خاک به‌ترتیب برابر ۳۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بوده‌است. هم‌چنین دمای اولیه ۲۲ درجه و دمای ثانویه ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد فرض شده‌است.

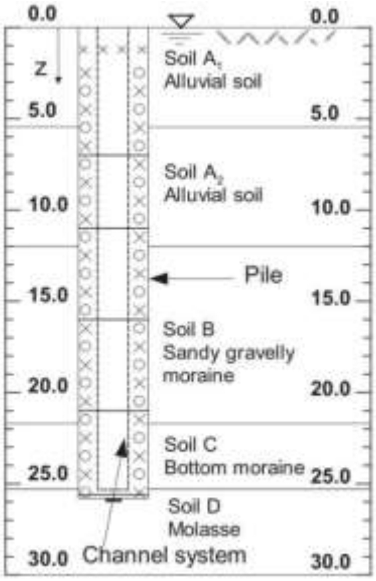
مدل‌سازی عددی شمع حرارتی

برای شبیه‌سازی رفتار شمع حرارتی، هندسه‌ی شمع به‌صورت یک استوانه به قطر یک متر و ارتفاع ٢٦ متر (شکل ٤) و هندسه‌ی خاک اطراف آن به‌صورت یک توده‌ی خاک چند لایه به طول و عرض ۲۰ متر و ارتفاع ۵۲ متر درنظر گرفته شده‌است. ضخامت و نام‌گذاری لایه‌های خاک مطابق شکل (۵) می‌باشد.

مشخصات مکانیکی، حرارتی و هیدرولیکی لایه‌های مختلف خاک و هم‌چنین مشخصات مکانیکی و حرارتی بتن در جدول (۳) ارائه شده‌است.



شکل ٤ هندسه‌ی مدل شمع حرارتی و خاک



شکل ۵ لایه بندی خاک در مدل شمع حرارتی [18]

برای معرفی رفتار مکانیکی خاک لایه‌ی B علاوه‌بر مدل رفتاری دراکر- پراگر از مدل رفتاری تورچی [28] نیز استفاده شده که مشخصات آن در جدول (٤) آمده‌است. این مشخصات باتوجه به وجود نتایج صحرایی بااستفاده از روش کالیبراسیون حاصل شده‌است. پارامترهای جدول (٤) نیز مانند پارامترهای جدول (۲) تعریف می‌شوند. هم‌چنین برای معرفی مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح‌شده تغییرات در سابروتین یومت مدل رفتاری تورچی [28] ایجاد شده‌است. باتوجه به شرایط اشباع خاک برای تحلیل شمع حرارتی از دو تحلیل مجزا استفاده شده‌است. در تحلیل اول برای تعریف اندرکنش حرارتی بین شمع و خاک از دو نوع اندرکنش Thermal Conductance و Heat Generation استفاده شده‌است و در تحلیل دوم برای تماس مکانیکی بین شمع و خاک نیز از یک رفتار تانژانتی از نوع پنالتی با ضریب اصطکاک ۰,۷ استفاده شده‌است. بارگذاری به سه صورت آزمون ۱ و ۲ و ۳ انجام‌شده که در آزمون ۱ فقط بار مکانیکی به‌اندازه‌ی ۱۳۰۰ کیلونیوتن به شمع وارد شده‌است. آزمون ۲ بارگذاری مکانیکی ندارد و فقط بار حرارتی به‌میزان ١٣,٦ درجه‌ی سانتی‌گراد و فرآیند تحکیم خاک درنظر گرفته می‌شود و درنهایت در آزمون ۳ بار مکانیکی و حرارتی و فرآیند تحکیم به‌صورت هم‌زمان اعمال

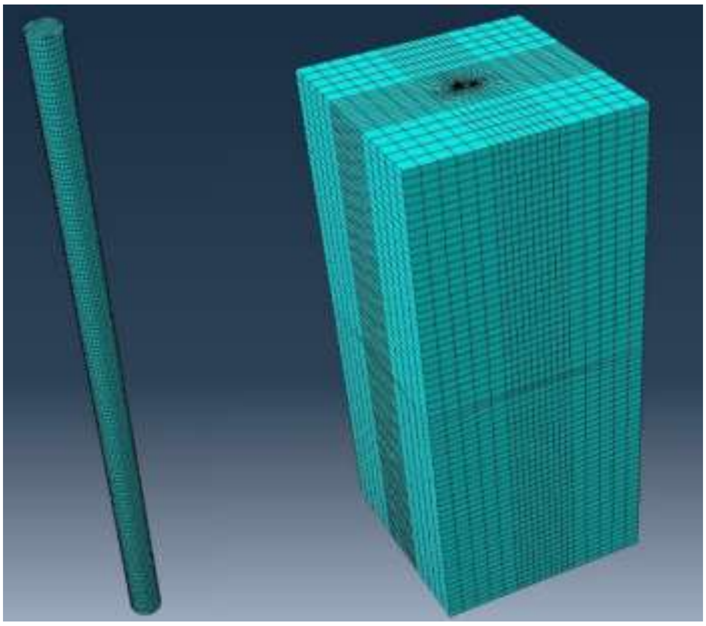
شده‌است. دمای اولیه‌ی خاک نیز ۱۳٫۶ درجه درنظر گرفته شده‌است. برای مش‌بندی شمع از المان‌های هشت‌گرهی خطی از گروه تنش سه‌بعدی با فن انتگرال کاهش‌یافته (C3D8R) استفاده شده و المان‌های خاک نیز از المان‌های هشت‌گرهی خطی از گروه فشار آب حفره‌ای، تنش(C3D8P) تشکیل شده‌است (شکل ٦).

جدول ۳ مشخصات شمع و لایه‌های خاک براساس مدل رفتاری دراکر- پراگر در مدل شمع حرارتی [18]

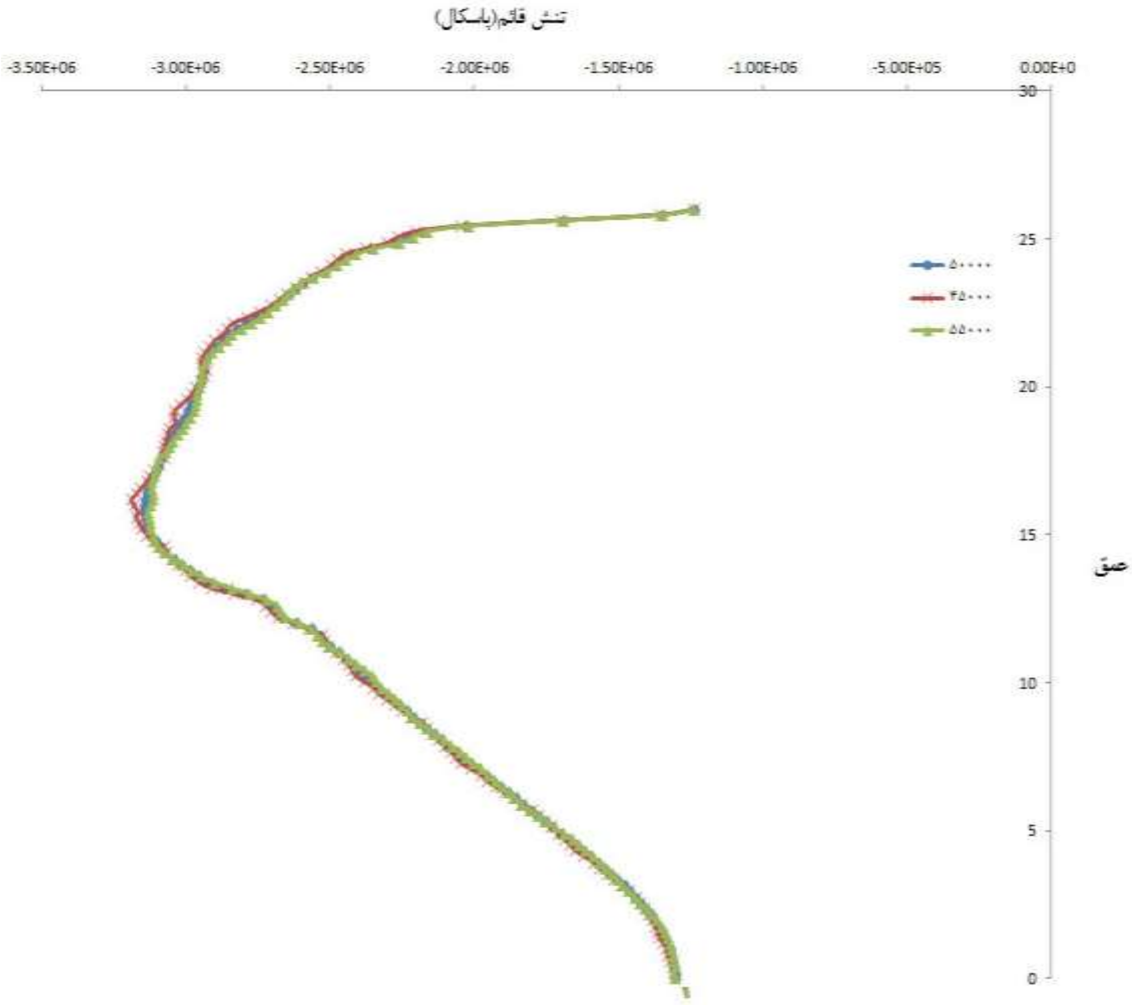
لایه‌های خاک	وزن مخصوص	تخلخل	نفوذپذیری	مدول بالک	مدول برشی	زاویه‌ی اصطکاک	چسبندگی	رسانایی حرارتی	ظرفیت گرمایی	ضریب انبساط حرارتی
	ρ	η	K^*	K	G	□	c	λ	ρ_c	β_s'
	$\frac{kg}{m^3}$		$\frac{m}{sec}$	MPa	MPa	(°)	kPa	$\frac{W}{m \cdot °C}$	$J/m^3 \cdot °C$	$°C^{-1}$
A1	2000	0.1	2×10^{-6}	122	113	30	5	1.8	2.4×10^6	10^{-5}
A2	1950	0.1	7×10^{-7}	122	113	27	3	1.8	2.4×10^6	10^{-5}
B	2000	0.35	1×10^{-6}	59	1000	23	6	1.8	2.4×10^6	10^{-4}
C	2200	0.3	1×10^{-6}	83	1400	27	20	1.8	2.4×10^6	10^{-4}
D	2550	-	-	620-3300	550-2800	-	-	1.1	2×10^6	10^{-6}
شمع	2500	-	-	17381	14313	-	-	2.1	2×10^6	10^{-5}

جدول ٤ مشخصات لایه‌ی سوم خاک براساس مدل رفتاری تورچی [28] در مدل شمع حرارتی

لایه‌ی خاک	M	λ	κA	GA/p'0	χ	n	C	D	c
لایه‌ی B	0.82	0.102	0.05	100	0.25	0	0.14	5	0.82



شکل ٦ مش‌بندی مدل شمع حرارتی و خاک



شکل ۷ نمودار مربوط به آنالیز حساسیت تأثیر ابعاد مش، برای سه حالت مختلف (با تعداد المان‌های ٤٥٠٠٠، ٥٠٠٠٠ و ٥٥٠٠٠) بر مقدار تنش قائم

هم‌چنین در شکل (۷) نتایج آنالیز حساسیت تأثیر ابعاد مش، برای سه حالت مختلف (با تعداد المان‌های ٤٥٠٠٠، ٥٠٠٠٠ و ٥٥٠٠٠) بر مقدار تنش قائم آمده‌است (تعداد المان‌ها رند شده‌است). همان‌طور که مشاهده می شود تغییر سایز مش‌بندی تغییری در مسئله و روند آن ایجاد نمی‌کند. البته بدیهی است تغییرات قابل‌توجه در اندازه‌ی مش ها می‌توانند باعث عدم هم‌گرایی و ناپایداری در حل مسئله گردد.

صحت‌سنجی

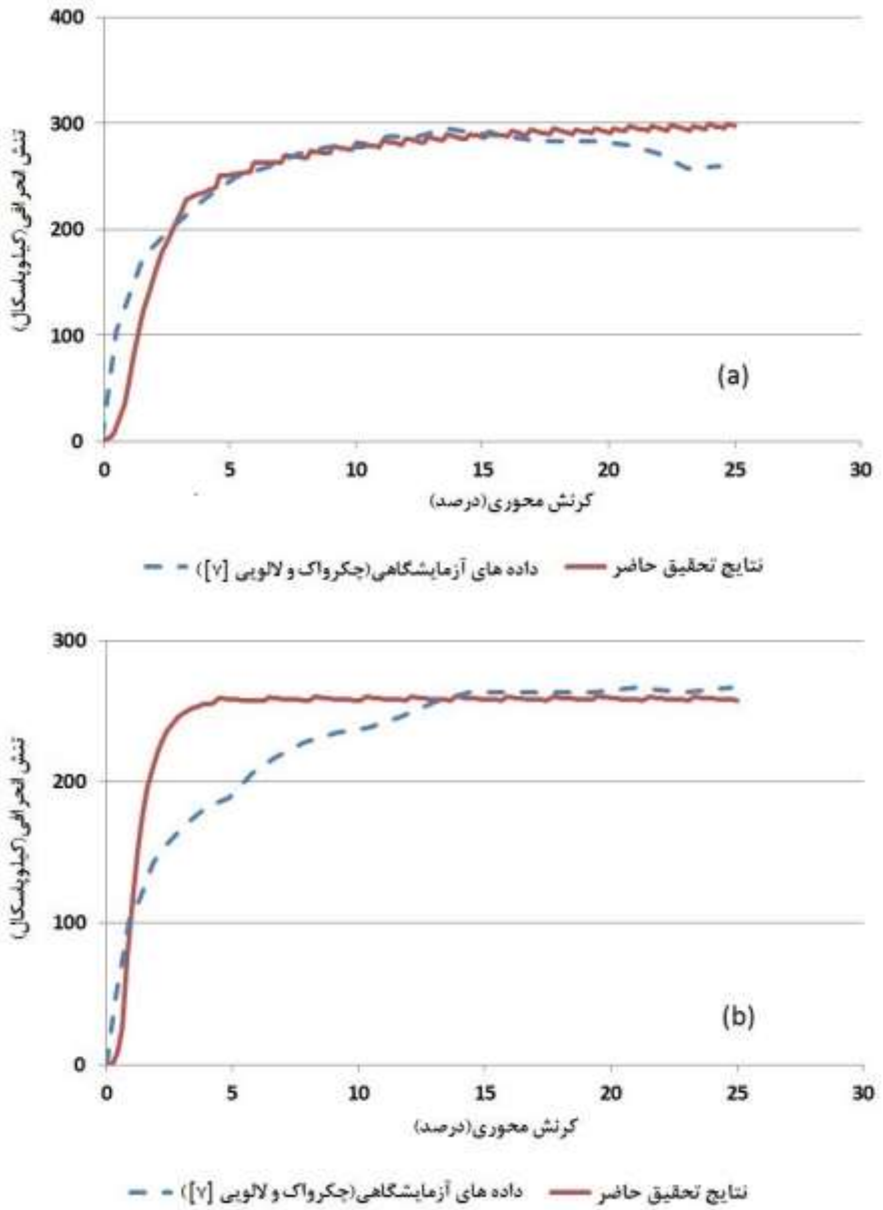
به‌منظور صحت سنجی مدل سازی‌های انجام شده نتایج به‌دست‌آمده از آنها با داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی موجود در تحقیقات گذشته مقایسه شده‌است که جزئیات هر کدام در دو قسمت آورده شده‌است.

آزمایش سه‌محوری CD

برای صحت‌سنجی سابروتین یومت نوشته‌شده‌ی نمودارهای تنش- کرنش و کرنش حجمی- کرنش محوری به‌دست‌آمده از مدل آزمایش سه‌محوری CD در شرایط ۲۲ درجه و ۹۰ درجه با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و ۳، با داده‌های آزمایشگاهی گزارش‌شده توسط چکرواک و لالویی [7] مقایسه شده‌است که در ادامه نتایج مربوط

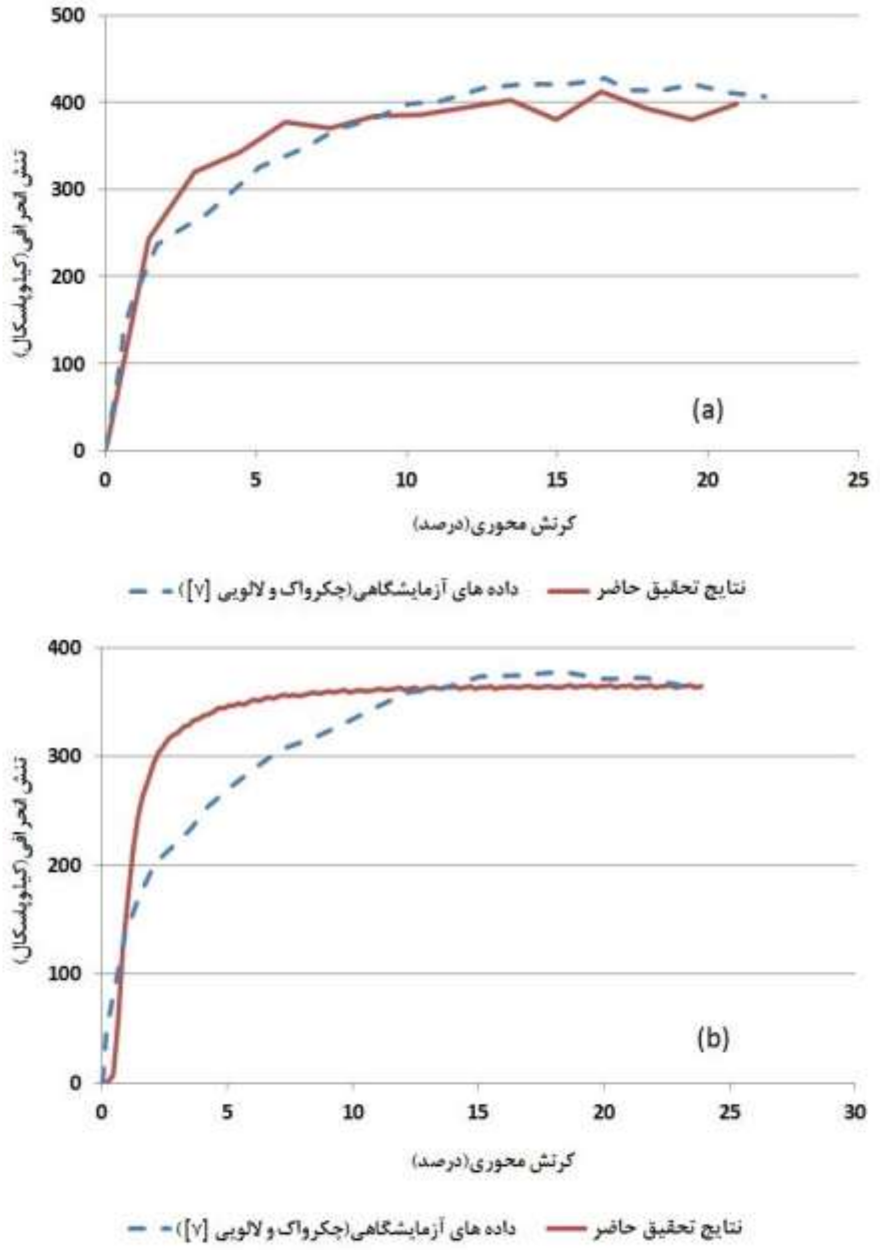
به نمودارهای تنش- کرنش ارائه شده‌است. در شکل (۸) نتایج با نسبت پیش‌تحکیمی ۳ در دمای ۲۲ و ۹۰ درجه نشان داده شده‌است.

مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی حاضر نشـان می‌دهد که مدل رفتاری اسـتفاده‌شـده در تحقیق حاضـر توانسـته در دمای ۲۲ درجه و ۹۰ درجه میزان مقاومت برشـی خاک را به‌خوبی پیش‌بینی کند، اما در دمای ۲۲ درجه در قسـمت سـخت‌شـوندگی نمودار ضعف‌هایی مشاهده می‌شود.

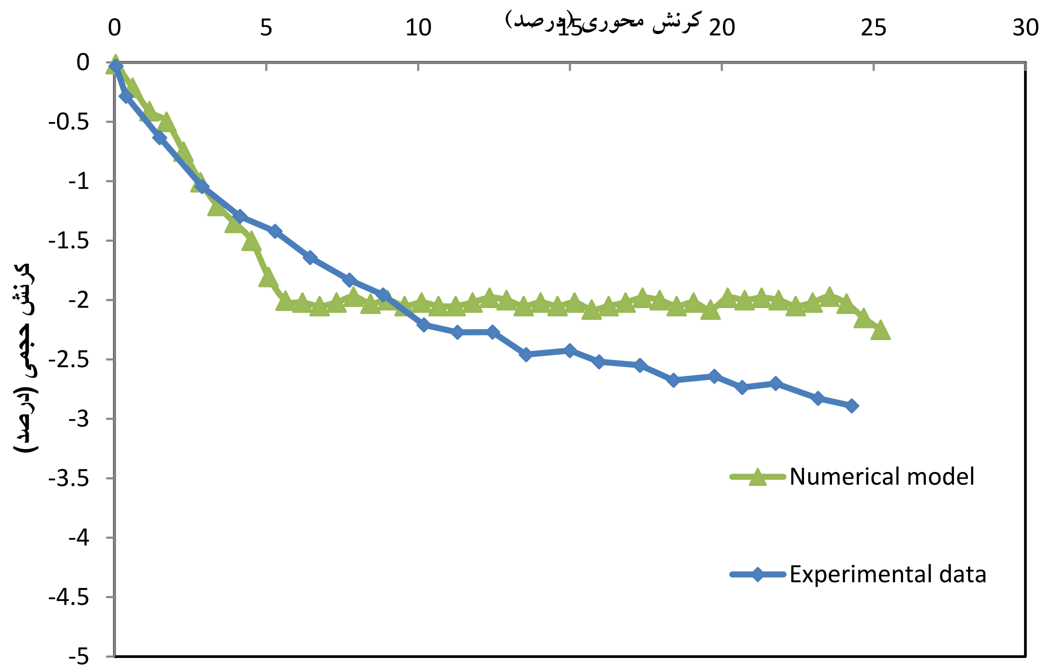


شکل ۸ نمودار تنش- کرنش مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۳: a) دمای ۹۰ درجه، b) دمای ۲۲ درجه

نمودار تنش- کرنش خاک در دمای ۲۲ و ۹۰ درجه با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ در شکل (۹) آمده‌است. باتوجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که سابروتین نوشته‌شده دارای توانایی مناسب برای پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی خاک رس اشباع در نسبت پیش‌تحکیمی و دمای متفاوت بوده‌است. هم‌چنین نمودار کرنش حجمی- کرنش محوری به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در شکل (۱۰) آمده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مجموع نتیجه‌ی به‌دست‌آمده رضایت‌بخش می‌باشد.



شکل ۹ نمودار تنش- کرنش مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۲: a) دمای ۹۰ درجه، b) دمای ۲۲ درجه



شکل ۱۰ نمودار کرنش حجمی- کرنش محوری به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

صحت‌سنجی در تحلیل شمع حرارتی

به‌منظور صحت سنجی عملکرد سابروتین نوشته شده در تحلیل شمع حرارتی، نتایج با داده‌های عددی و صحرایی گزارش‌شده توسط لالویی و همکاران [18] مقایسه شده‌است.

در شکل (۱۱) مقادیر تنش قائم در طول شمع تحت بار مکانیکی ۱۳۰۰ کیلونیوتن براساس نتایج صحرایی و عددی گزارش‌شده توسط لالویی و همکاران [18] و هم‌چنین نتایج به‌دست‌آمده از مدل حاضر بااستفاده از سه مدل رفتاری دراکر- پراگر، کم‌کلی اصلاح‌شده و تورچی [28] آورده شده‌است.

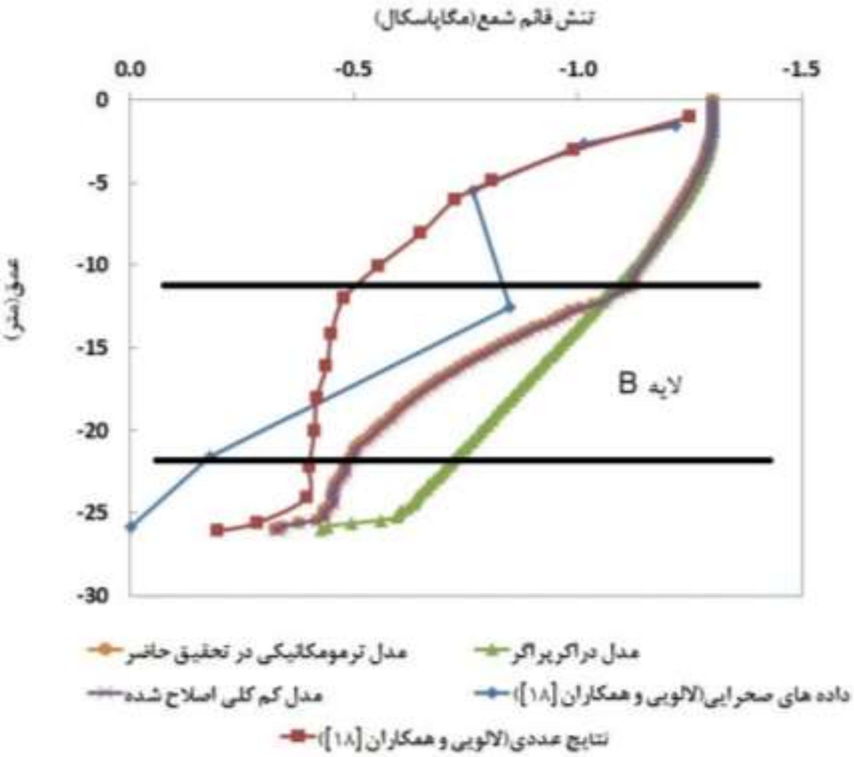
همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود هنگامی که شمع حرارتی تحت بار مکانیکی خالص قرار گرفته‌است، مقایسه‌ی نتایج عددی و صحرایی نشان می‌دهد که در لایه‌ی B استفاده از مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] و کم‌کلی اصلاح‌شده نتایج بهتری نسبت به مدل رفتاری مکانیکی دراکر- پراگر داشته‌است.

شکل (۱۲) تنش قائم ایجاد شده در طول شمع در پایان فاز گرمایش یک تحکیم ۲۸ روزه تحت بار حرارتی ۱۳ درجه را طبق مطالعات لالویی و همکاران [18] و نتایج مدل‌سازی حاضر نشان داده‌است.

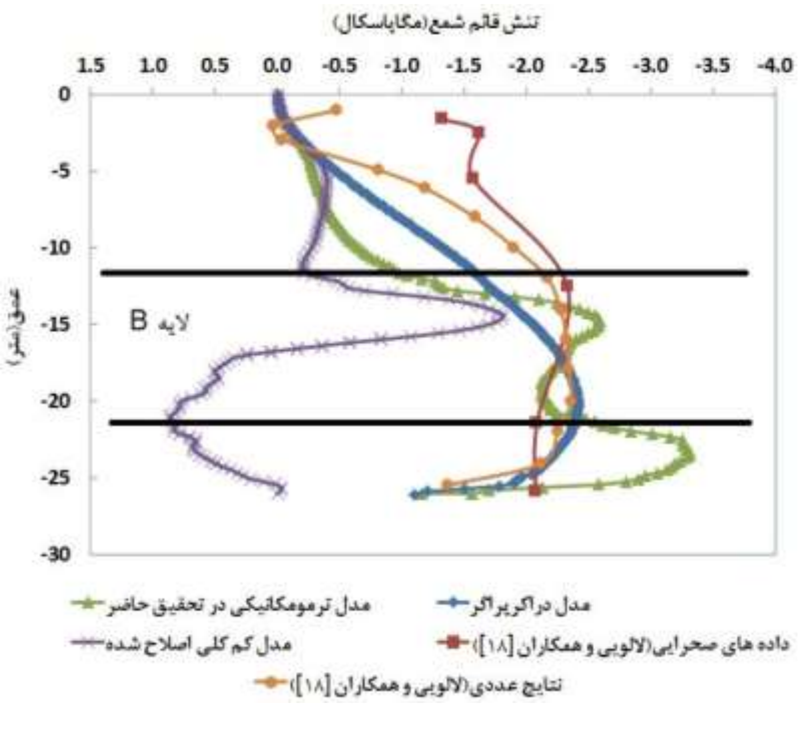
طبق شکل (۱۲) که تنش قائم شمع تحت بار حرارتی را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که مدل رفتاری تورچی [28] نسبت به مدل رفتاری دراکر- پراگر و کم‌کلی اصلاح‌شده توانایی مناسب‌تری برای پیش‌بینی تنش قائم شمع داشته است. هم‌چنین برخلاف نیمه‌ی اول لایه‌ی B، در نیمه‌ی دوم آن مدل رفتاری تورچی [28] نتایج بهتری را حتی نسبت به مدل رفتاری ترمومکانیکی دراکر- پراگر که توسط لالویی و همکاران [18] مورد استفاده قرار گرفته‌است ارائه کرده‌است.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی حاضر و مطالعات لالویی و همکاران [18] مربوط به تنش قائم در طول شمع تحت بارگذاری همزمان ۱۳۰۰ کیلونیوتن بار

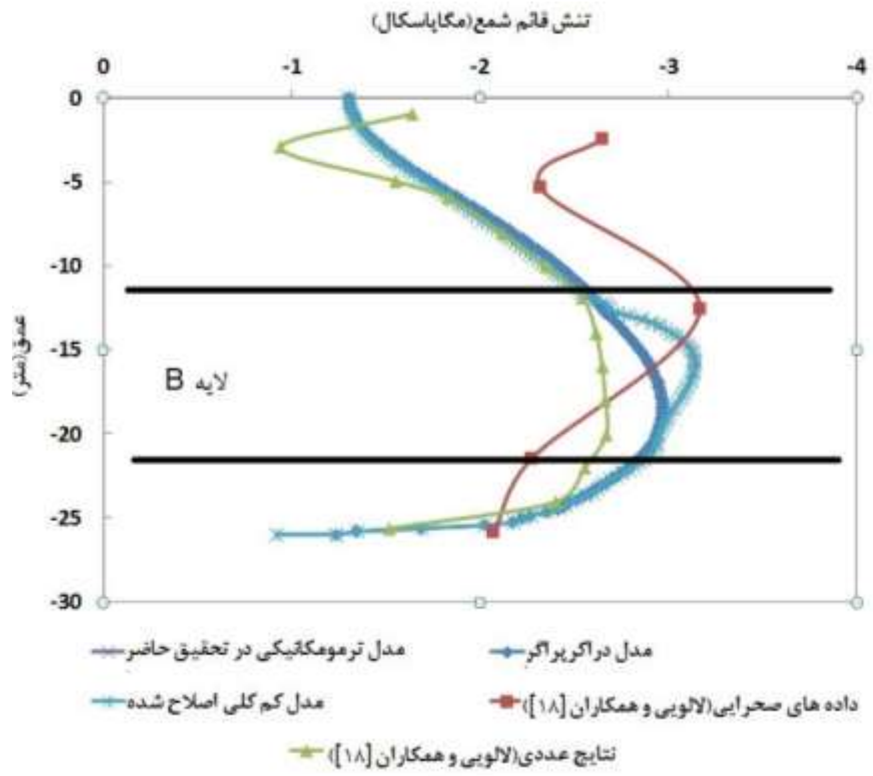
مکانیکی و ۱۳ درجه بار حرارتی در روز ۱۲ یک فرآیند تحکیم ۲۸ روزه در شکل (۱۳) آمده‌است.



شکل ۱۱ تنش قائم در طول شمع تحت بار مکانیکی ۱۳۰۰ کیلونیوتن



شکل ۱۲ تنش قائم در طول شمع تحت بار حرارتی ۱۳,٤ درجه



شکل ۱۳ تنش قائم در طول شمع تحت بار مکانیکی ۱۳۰۰ کیلونیوتن و بار حرارتی ۱۳٫٤ درجه

به‌طور کلی بیشینه تنش قائم موجود در شمع یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی شمع‌ها می‌با شد. بر این اســـاس پیش‌بینی بیشـــینه تنش قائم در تحلیل دقیق‌تر شمع‌های حرارتی دارای اهمیت بسیاری ا ست. باتوجه به شکل (۱۳) می‌توان دریافت که بیشینه تنش قائم شمع تحت بارگذاری هم‌زمان مکانیکی و حرارتی در لایه‌ی B خاک رخ داده‌است که استفاده از مدل رفتاری کم‌کلی اصــلاح‌شــده و تورچی [28] در این لایه باعث افزایش قابل توجه هم‌خوانی نتایج عددی و صــحرایی نسـبت‌به زمانی که مدل رفتاری دراکر- پراگر توصیف رفتار خاک در این لایه را بر عهده دارد، شده‌است.

باتوجه به قســمت اول صــحت‌ســنجی، می‌توان در یا فت که مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] به‌درستی به نرم‌افزار آباکوس اضـافه شـده‌اسـت. نتایج موجود در قسـمت دوم هم تأثیر قابل‌توجه مدل رفتاری خاک در بررسی رفتار شمع‌های حرارتی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که ا ستفاده از مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] نسبت به مدل مکانیکی کم‌کلی اصلاح‌شده تغییری در نتایج به‌دست‌آمده ایجاد نکرده‌است. همچنین همان‌طور که قبلاً ا شاره شد، آنالیز ح سا سیت مش در مدل شمع حرارتی انجام شده و تغییر در اندازه‌ی مش‌ها تأثیر قابل‌توجهی در نتایج نداشته‌است.

نتایج و بحث

به‌منظور برر سی بی شتر تأثیر مدل رفتاری خاک بر رفتار شمع حرارتی و خاک مجاور آن، خروجی‌های مربوط به مؤلفه‌های قائم و شعاعی تنش و کرنش به‌وجودآمده در شمع و خاک مجاور آن در لایه‌ی B استخراج شده‌است.

در شـــکـل (١٤) تنش‌هـای قـائم و شـــعـاعی به‌وجودآمده در خاک مجاور شمع در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی آورده شـــده‌اســـت. هم‌چنین کرنش‌های قائم و شـعاعی به‌وجودآمده در خاک مجاور شمع نیز در شکل (١٥) قابل‌مشاهده است.

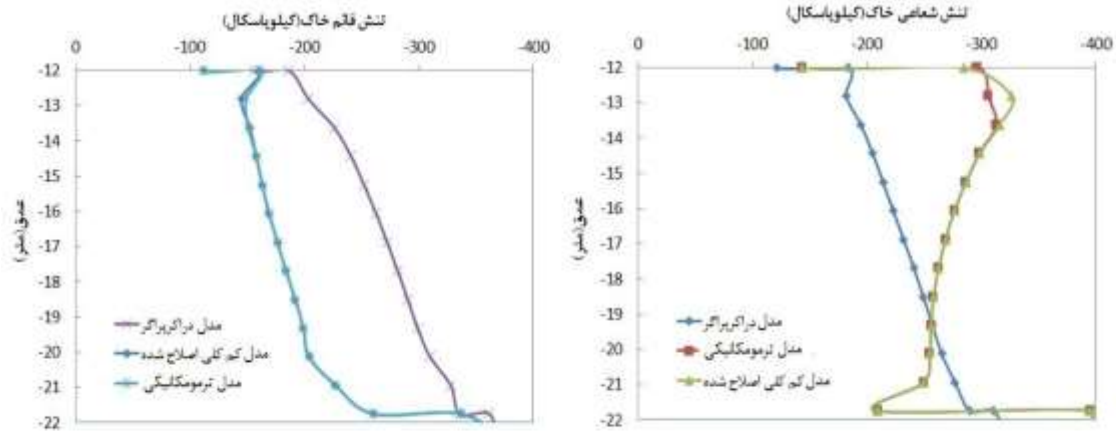
همان‌طور که در شکل (١٤) م شخص ا ست تغییر

مدل رفتاری خاک باعث تغییر تنش شعاعی و قائم خاک مجاور شمع حرارتی شده به‌نحوی‌که این تغییر در بعضی نقاط به ۱۰۰ کیلوپاسکال هم رسیده‌است، اما تفاوتی میان مدل مکانیکی کم‌کلی اصلاح‌شده و ترمومکانیکی تورچی [28] وجود ندارد. هم‌چنین باتوجه به شکل (۱۵) می‌توان تغییر میزان کرنش شعاعی و قائم خاک ناشی از تغییر مدل رفتاری خاک مجاور شمع حرارتی را ملاحظه کرد.

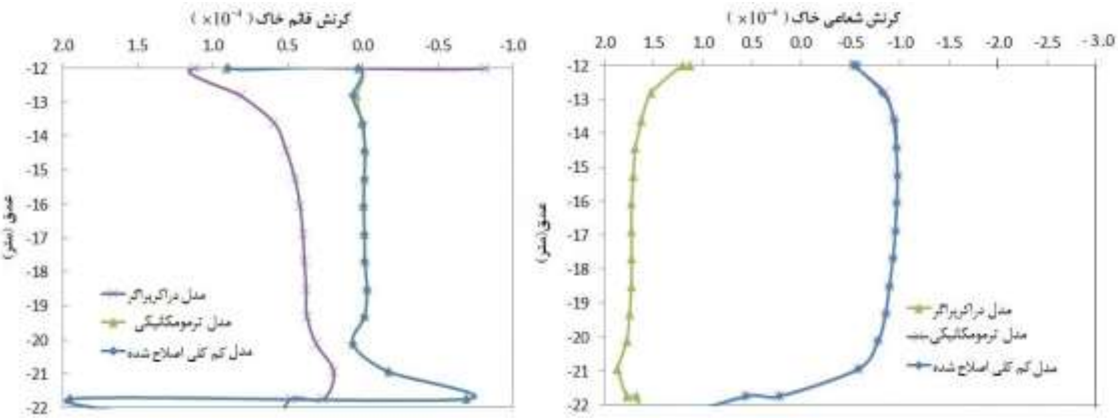
شکل (١٦) تغییرات تنش شعاعی در طول شمع حرارتی تحت بارگذاری هم‌زمان حرارتی به‌میزان ١٣,٤ درجه و مکانیکی به‌اندازه‌ی ۱۳۰۰ کیلونیوتن را نشان داده‌است.

مشاهده می‌شود همان‌طور که میزان تنش قائم به‌وجودآمده در شمع حرارتی برای خاک لایه‌ی B، بااستفاده از مدل رفتاری تورچی [28] نسبت‌به حالت استفاده از مدل رفتاری دراکر- پراگر بیشتر شده، در شکل (١٦) هم تنش شعاعی موجود در شمع حرارتی در همان لایه بااستفاده از کد یومت بیشتر از مدل رفتاری دراکر- پراگر به‌دست آمده‌است. هم‌چنین نتایج مدل مکانیکی کم‌کلی اصلاح شده تغییر قابل‌توجهی نسبت به مدل رفتاری تورچی [28] نداشته‌است.

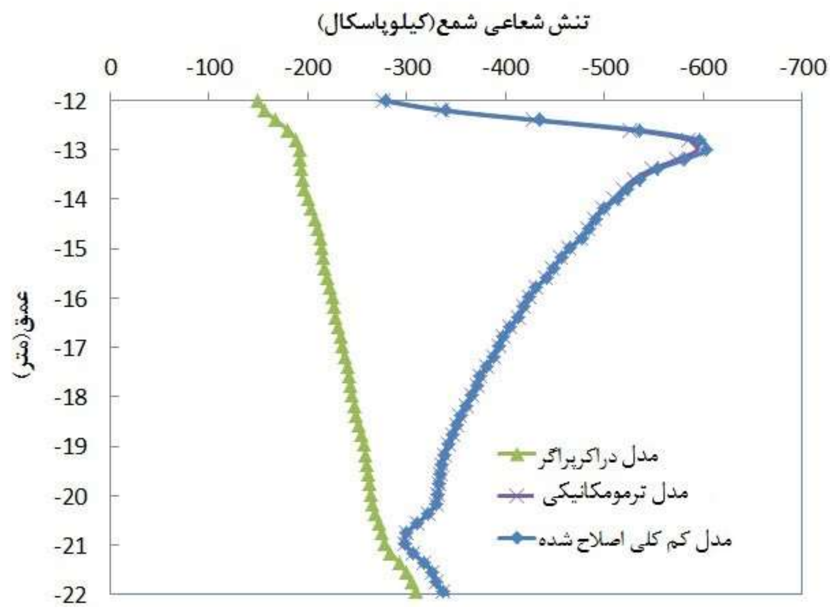
هم‌چنین میزان تأثیر مدل رفتاری خاک بر کرنش‌های شعاعی و قائم شمع نیز در شکل (۱۷) آمده که باتوجه به آن می‌توان دریافت که مدل رفتاری خاک مجاور شمع تأثیر نسبتاً کمی در مؤلفه‌های کرنش شمع حرارتی داشته‌است.



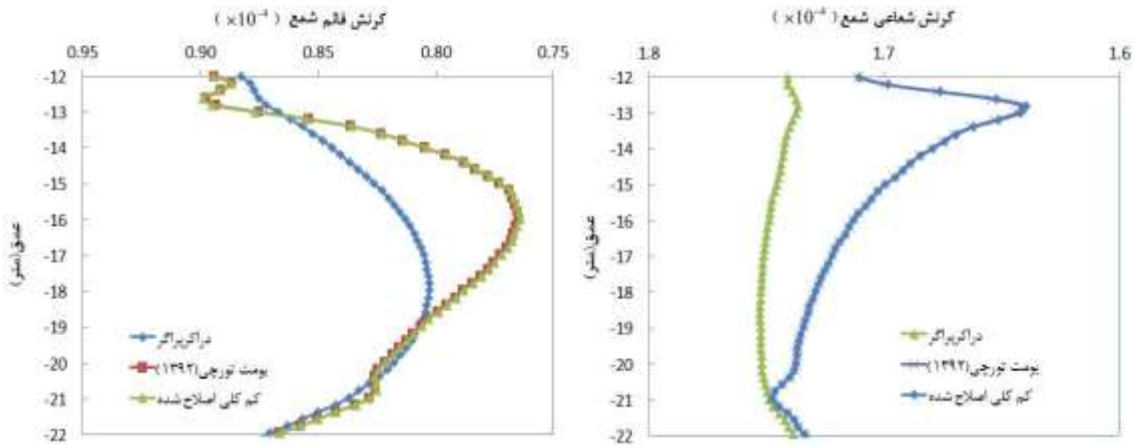
شکل ١٤ تنش‌های قائم و شعاعی در خاک مجاور شمع در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی



شکل ۱۵ کرنش‌های قائم و شعاعی در خاک مجاور شمع در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی



شکل ١٦ تنش شعاعی در طول شمع حرارتی در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی



شکل ١٧ کرنش‌های قائم و شعاعی در طول شمع حرارتی در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی

نتیجه‌گیری

تحقیق عددی حاضر شامل مطالعه‌ی پارامتری روی مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] و هم‌چنین بررسی عملکرد شمع حرارتی تحت بارگذاری حرارتی و مکانیکی بااستفاده از مدل‌های رفتاری مکانیکی و ترمومکانیکی می‌باشد. برای اضافه‌کردن مدل رفتاری ترمومکانیکی از قابلیت سابرویتن‌نویسی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد و دو مدل سه‌بعدی آزمایش سه‌محوری و شمع حرارتی تهیه شد. بر این اساس نتایج زیر به‌دست آمده‌است:

۱. در مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] پارامترهای الاستیک تأثیر کمی بر تنش تسلیم دارد و پارامترهای اضافه‌شده به تابع تسلیم مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح‌شده در رفتار خاک بسیار تأثیرگذار بوده‌است.

۲. مدل رفتاری انتخاب‌شده برای خاک مجاور شمع حرارتی در تحلیل عملکرد شمع حرارتی مؤثر بوده و نتایج عددی حاصل از مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] و کم‌کلی اصلاح‌شده نسبت به مدل

رفتاری مکانیکی دراکر- پراگر به نتایج صحرایی نزدیک‌تر بوده‌است.

۳. به‌علت مقدار کم تنش به‌وجودآمده در خاک اطراف شمع و تغییر دمای کم خاک، تفاوت قابل‌توجهی میان نتایج مدل ترمومکانیکی تورچی [28] و مدل مکانیکی کم‌کلی اصلاح‌شده وجود ندارد.

٤. مؤلفه‌های شعاعی و قائم تنش و کرنش خاک اطراف شمع حرارتی و هم‌چنین تنش قائم و شعاعی شمع حرارتی متأثر از مدل رفتاری خاک اطراف شمع است، اما تغییر در مدل رفتاری خاک اطراف شمع، تغییر قابل‌توجهی در کرنش‌های شعاعی و قائم شمع ایجاد نمی‌کند.

مراجع

1. Saggu, R., and Chakraborty, T., "Thermomechanical Response of Geothermal Energy Pile Groups in Sand", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 16(4), Pp. 040151001-13, (2016).
2. Xiong, Y. -l., et al., "A Unified Thermal-hardening and Thermal-softening Constitutive Model of Soils", *Applied Mathematical Modelling,* Vol. 74, Pp. 73-84, (2019).
3. YAO, Y. P., and ZHOU, A. N., "Non-isothermal Unified Hardening Model: A Thermo-elasto-plastic Model for Clays", *Géotechnique,* Vol. 63(15), Pp. 1328-1345, (2013).
4. Cui, Y. J., Sultan, N., and Delage, P., "A Thermomechanical Model for Saturated Clays", *Canadian Geotechnical Journal,* Vol. 37(3), Pp. 607-620,(2000).
5. Chiu, S. L., "Behaviour of Normally Consolidated Clay at Elevated Temperature", University of Sydney, Sydney, Australia (1996). ۱
6. Burghignoli, A., Desideri, A., and Miliziano, S., "Deformability of Clays under Non Isothermal Conditions", *RIG,* Vol. 4, Pp. 92, (1992).
7. Cekerevac, C., and Laloui, L., "Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,* Vol. 28(3), Pp. 209-228,(2004).
8. Moritz, L., "Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperatures", in SGI Rapport, Report No. 276, Sweden (1995).
9. Krishnan, J. M., et al., "Thermomechanical Framework for the Constitutive Modeling of Asphalt Concrete", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 6(1), Pp. 36-45, (2006).
10. Towhata, I., et al., "Volume Change of Clays Induced by Heating as Observed in Consolidation Tests", *soils and foundations,* Vol. 33(4), Pp. 170-183, (1993).
11. Robinet, J. C., et al., "A Constitutive Thermomechanical Model for Saturated Clays", *Engineering Geology,* Vol. 41(1), Pp. 145-169, (1996).
12. Wang, L. Z., Wang, K. J., and Hong, Y., "Modeling Temperature-Dependent Behavior of Soft Clay", *Journal of Engineering Mechanics,* Vol. 142(8), Pp. 040160541-13, (2016).

13. Graham, J., et al., "Modified Cam-Clay Modelling of Temperature Effects in Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38(3), Pp. 608-621, (2001).
14. Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., and Bouazza, A., "Thermally Induced Volume Change and Excess Pore Water Pressure of Soft Bangkok Clay", *Engineering Geology*, Vol. 89(1), Pp. 144-154, (2007).
15. Hamidi, A., and Khazaei, C., "A Thermo-mechanical Constitutive Model for Saturated Clays", *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 4(4), Pp. 445-459, (2010).
16. Hong, P. Y., et al., "On Some Advanced Thermo-mechanical Models for Saturated Clays", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 37(17), Pp. 2952-2971, (2013).
17. Hong, P. Y., et al., "A Two-surface Thermomechanical Model for Saturated Clays", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 40(7), Pp. 1059-1080, (2016).
18. Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L., "Experimental and Numerical Investigations of the Behaviour of a Heat Exchanger Pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 30(8), Pp. 763-781, (2006).
19. Tri, N. V., et al., "Long-term Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles in Clay", *Environmental Geotechnics*, Vol. 0(0), Pp. 1-12, (2020).
20. Khodaparast, M., Kiani, M., and Bayesteh, H., "Numerical Study of Bearing Capacity and Consolidation Settlement of Energy Piles in Fine-grained Soils", in Energy Geotechnics, *Proceedings of the 1st International Conference on Energy Geotechnics*, Pp.57, ICEGT, (2016).
21. Saggu, R., and Chakraborty, T., "Thermomechanical Analysis and Parametric Study of Geothermal Energy Piles in Sand", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 17(9), Pp. 04017076, (2017).
22. Ma, Q., et al.,"An Approach for Modelling Volume Change of Fine-grained Soil Subjected to Thermal Cycles", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 54(6), Pp. 896-901, (2017).
23. Tsetoulidis, C., Naskos, A., and Georgiadis, K., "Numerical Investigation of the Mechanical Behaviour of Single Energy Piles and Energy Pile Groups", *in Energy Geotechnics, CRC Press Boca Raton, FL, USA*. Pp. 569-575,(2016).
24. Di Donna, A., Rotta Loria, A. F., and Laloui, L., "Numerical Study of the Response of a Group of Energy Piles under Different Combinations of Thermo-mechanical Loads", *Computers and Geotechnics*, Vol. 72, Pp. 126-142, (2016).
25. AMATYA, B. L., et al., "Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles", *Géotechnique*, Vol. 62(6), Pp. 503-519, (2012).
26. Akrouch, G. A., Sánchez, M., and Briaud, J. -L., "Thermo-mechanical Behavior of Energy Piles in High Plasticity Clays", *Acta Geotechnica*, Vol. 9(3), Pp. 399-412, (2014).
27. Nguyen, V. T., Tang, A. M., and Pereira, J.-M., "Long-term Thermo-mechanical Behavior of Energy

Pile in Dry Sand", *Acta Geotechnica,* Vol. 12(4), Pp. 729-737, (2017).

28. تورچی، سـعید،"ارائه یک مدل رفتاری ترمومکانیکی برای خاکهای رسـی غیر اشـباع" پایان نامه کارشـناسـی ارشـد، دانشـکده‌ی فنی و مهندسی ، دانشگاه خوارزمی تهران، (۱۳۹۲)

29. Sadrnejad, s. a., "Soil Plasticity and Modeling". دوم ed. tehran: k.n. toosi university of technology, pp. 285-307 (1394).